

# 船舶浮筏隔振系统冲击响应的时域计算

赵应龙 何琳 黄映云

武汉科技大学

## 船舶浮筏隔振系统冲击响应的时域计算

# The Computation of Shock Response of Floating Raft Shock-resistant System in the Time Domain

赵应龙 何琳 黄映云

(武汉大学)

**摘 要：**水面船舶在战争条件下的主要威胁来自水中爆炸物的非接触性爆炸，选用抗冲击性能好的设备和对设备采取冲击防护措施可以保证船上设备的安全性，即这些措施可以限制冲击作用时设备与基座之间的最大相对位移以及设备的最大加速度，使用隔振装置就是一种较好的冲击防护措施。因此在隔振装置的设计阶段必须对其抗冲击性能进行校核，从而保证隔振装置的抗冲击性能。各种有限元分析软件例如 MSC. Nastran 软件可以应用于隔振装置的抗冲击性能校核。本文应用 MSC. Nastran 软件及其前后处理模块 MSC. Patran 对旅游船上柴油发电机组浮筏隔振装置进行有限元建模和分析，首先对筏体和浮筏隔振系统模型进行理论模态分析和计算，且计算结果和试验结果吻合较好；接着对浮筏隔振系统模型进行瞬态响应分析，从而考核该装置的抗冲击能力。本文的分析计算方法可用于隔振抗冲击装置抗冲击性能的分析计算。

**关键词：**MSC. Nastran 有限元分析 瞬态响应 浮筏 隔振 抗冲击

**Abstract:** Choosing the equipment with good shock-resistant performance and taking shock protection measures while designing the onboard settings, the safety of onboard settings can be assured when warships, especially submarine subjected to non-contact underwater explosion, that is, these means can be used to limit the rattlespace (i.e., the maximum displacement of the equipment relative to the base) and the peak acceleration experienced by the equipment. Using shock-resistant equipments is one of shock protection means. The shock-resistant performance of the shock-resistant equipments should be verified in the design phase of the equipments. The FEA (Finite Element Analysis) software, for example, MSC. Nastran®, can be used to verify the shock-resistant performance. MSC. Patran® and MSC. Nastran are used for modeling and analyzing the floating raft vibration isolating equipment in this paper. The model of the floating raft and the floating raft vibration isolating system are theoretically analyzed and calculated, and the analysis results are in agreement with the test results. The transient response analysis of the system model follows

the modal analysis of the floating raft vibration isolating system. And it is used to verify the shock-resistant performance. The analysis and calculation method used in this paper can be used to analyze the shock-resistant performance of onboard shock-resistant equipments.

**Key words:** MSC.Nastran, FEA, transient response, raft, vibration isolating, shock resistant.

水面船舶在战争条件下的主要威胁来自水中非接触性爆炸,对于船舶遭受水中非接触性爆炸问题主要关心如下两方面的问题:第一是船体结构的完整性和水密性,第二是船上设备的完整性。在船舶设计阶段,设计师通常非常关心船体强度,因此在冲击作用发生时,可能出现船体不破坏而艇内设备破坏的情况。所以,在船舶设计阶段迫切需要提高船内设备的抗冲击能力。目前主要有两种途径用于提高船上设备的抗冲击能力,一是选用抗冲击性能好的设备作为船用设备,二是采用冲击防护措施,例如设计船用设备时对设备和系统应用隔振装置。目前隔振装置的设计分析通常采用计算机辅助分析方法,接着进行抗冲击冲击试验从而校核冲击安全性。随着计算机辅助分析以及各种有限元分析软件的发展,目前在隔振装置的设计中大量应用各种计算机辅助分析工具及有限元分析软件。

对于船舶机械设备抗冲击的研究始于 20 世纪 30 年代,1932 年,Biot 在研究建筑物对地震的响应时提出了冲击响应谱的概念,随后冲击响应谱的概念被应用于机械设备的冲击响应分析。美国海军发展了几种冲击设计分析方法用于设备的抗冲击设计分析,包括冲击设计数和基于冲击谱的响应分析方法(DDAM),目前使用的是 1995 年修订版的 DDAM 方法<sup>[1]</sup>。欧洲各国海军使用的分析方法大多是以德国海军规范 BV043/85 为代表的冲击分析方法。

本文应用有限元分析软件,采用时域动力学分析方法对浮筏抗冲击系统的冲击响应特性进行分析计算,而且计算结果与试验结果吻合较好。该方法可应用于隔振装置的动响应特性分析。

## 1 MSC.Nastran 的瞬态响应分析功能

瞬态响应分析用于计算时变激励载荷作用下结构和系统的动力响应。在 MSC.Nastran 中根据结构和所施加载荷特性的不同有两种不同的数值方法可供选用:直接法和模态法。直接法瞬态响应分析是对系统的全部耦合运动微分方程进行直接数值积分来求解;而模态瞬态响应分析则是利用结构的模态振型来对耦合的系统运动微分方程进行解耦,然后再由单个模态响应的叠加来得到问题的解。

### 1.1 直接法瞬态响应分析

直接法也称逐步积分法,该分析方法给出结构对随时间变化的载荷的响应。结构可以同时具有粘性阻尼和结构阻尼。该分析方法在节点自由度上直接形成耦合的运动微分方程,系

统的耦合运动微分方程为

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [B]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{p(t)\}$$

其中  $[M]$ ,  $[B]$ ,  $[K]$  分别为质量矩阵, 阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\{u(t)\}$ ,  $\{p(t)\}$  分别为位移向量和外力函数向量。

直接法是对耦合的系统运动微分方程进行直接积分, 即在时域上将响应的时间历程离散为具有固定时间间隔  $\Delta t$  (时间步长) 的离散时间点上的值。对于线性系统每一个时间步长上系统的等效刚度矩阵是不变的, 因此只需按外加荷载改变等效力向量即可对该时间段上的系统响应进行求解; 若系统具有刚度非线性, 则需在每一个时间步上对等效刚度矩阵进行修改。

根据积分格式的不同, 直接积分方法主要分为两类: 显式算法和隐式算法<sup>[2]</sup>。显式算法利用系统在  $t$  时刻的运动微分方程求解  $t + \Delta t$  时刻的响应, 其等效刚度矩阵与系统刚度矩阵无关, 这种算法一般是条件稳定的, 但是对时间步长的限制非常严格。隐式算法利用系统在  $t + \Delta t$  时刻的运动微分方程来求解  $t + \Delta t$  时刻的响应, 其等效刚度矩阵中含有系统刚度矩阵的贡献, 这类算法的特点是只要选择合适的积分参数, 一般就能够做到无条件稳定。显然, 当系统中存在刚度非线性因素时, 采用隐式算法在积分的每一步上得到的等效刚度矩阵是变化的, 因而需要重新形成; 而采用显式算法时由于将与质量、阻尼、刚度矩阵有关的项都移到等式的右边作为等效力处理, 从而省去了等效刚度矩阵重新形成的过程。

MSC.Nastran 所用的数值积分方法为 Newmark- $\beta$  方法, 替代方法有 Wilson- $\theta$  方法, Hughes- $\alpha$  方法, Bathe 方法<sup>[3]</sup>。

直接法瞬态响应分析可以求出随时间变化的位移、速度、加速度和约束力以及单元应力。

直接法求解大模型问题需要较长的时间, 可以求解非线性问题。

## 1.2 模态法瞬态响应分析

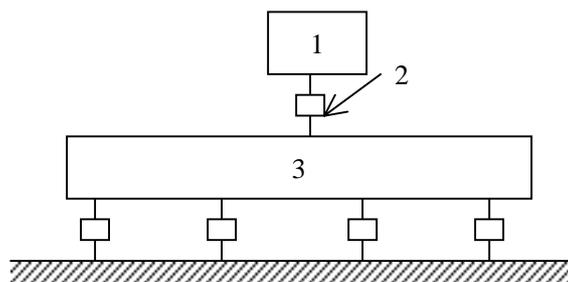
模态法也称振型迭加法, 在模态法瞬态响应分析中, 采用模态分析方法对系统的耦合运动微分方程进行解耦, 得到一组解耦的单自由度系统, 然后对解耦的单自由度系统进行时域的数值积分求解, 即采用 Duhamel 积分求解模态响应, 再通过模态叠加法对模态响应进行叠加, 从而求得系统运动微分方程的解。因此模态法不属于时域的计算方法, 而属于频域计算方法。

模态法可以得出与用直接法瞬态响应分析类型相同的输出结果。

模态法物理概念清晰, 对大模型可以对问题规模进行压缩, 因此对大模型求解速度快, 但模态法不能求解非线性问题。

## 1.3 模型算例

应用本文介绍的 MSC.Nastran 软件的模态法和直接法瞬态响应分析功能对一双层隔振装置有阻尼与无阻尼模型分别进行计算,其目的主要是通过对模型的计算,从而对模态法和直接法进行对比。用于计算的双层隔振装置模型如图 1 所示。



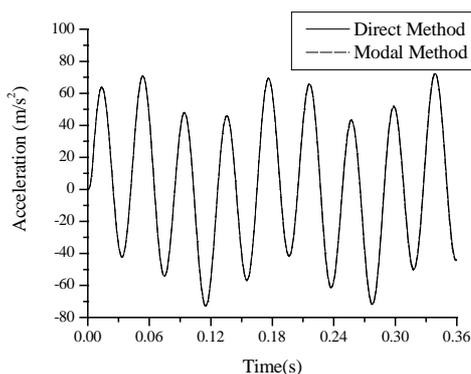
1-设备, 2-隔振器, 3-中间质量块

图 1 双层隔振装置物理模型

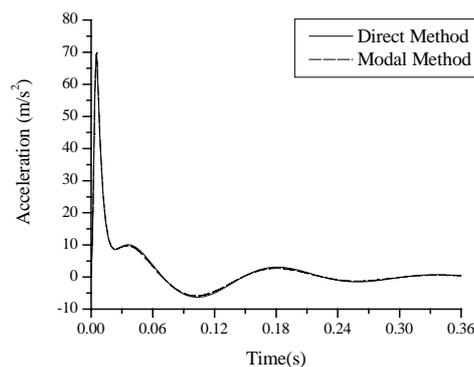
计算中给定的加速度激励为半正弦时间历程,其中加速度幅值为  $200\text{ m/s}^2$ ,加

速度激励脉冲宽度为  $6\text{ ms}$ 。计算中加速度激励作用于系统的垂向,横向以及纵向激励时的计算与垂向激励时的计算方法相同。

计算中分别采用模态法和直接法对双层隔振装置有阻尼模型与无阻尼模型两种情况进行计算。通过计算可求得设备和中间质量块的加速度以及位移响应。其中图 2 给出了两种计算方法求得的中间质量块的垂向加速度响应的比较。



(a) 无阻尼模型中间质量块的垂向加速度响应



(b) 有阻尼模型中间质量块的垂向加速度响应

图 2 两种计算方法的结果对比

图 2(a)所示为无阻尼模型分别用直接法和模态法求得的中间质量块垂向加速度响应,图 2(b)所示为有阻尼模型分别用直接法和模态法求得的中间质量块垂向加速度响应。从图中可以看出,无论是无阻尼模型还是有阻尼模型,直接法和模态法计算的结果曲线在图中是重合的,即计算结果基本相同。由于模型中不存在非线性因素,因此两种计算方法计算所得的结果基本相同也是必然的,同时也说明了计算结果的准确性。

## 2 工程实例

本文所讨论的工程实例为某旅游船发电机组浮筏隔振装置。

## 2.1 浮筏隔振装置组成

浮筏隔振装置主要由两台柴油发电机组、上下层隔振器和中间筏体组成。浮筏隔振装置的实体造型如图 3 所示。其中筏体是钢结构的环氧树脂混凝土结构，两台柴油发电机组各通过六只隔振器弹性的安装在筏体上，浮筏隔振系统通过 18 只隔振器弹性的固定在旅游船的船体基座上。

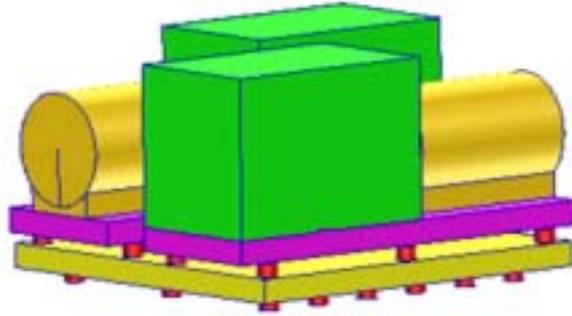


图 3 浮筏隔振系统实体造型

## 2.2 有限元模型

本文采用 MSC. Nastran 大型有限元分析软件的前后处理模块 MSC. Patran 对浮筏系统进行有限元建模。

在有限元建模时，根据参数等效原则，在保证发电机组的柴油机以及发电机的质量、质心以及外形尺寸一致的前提下，首先将发电机组简化为均质的各向同性弹性体，然后用 8 结点的六面体单元对设备实体进行有限元网格划分。

上下层隔振器的每个隔振器分别用三个一维弹簧单元和三个一维阻尼单元建模。

考虑到筏体结构的复杂性以及筏体材料是复合材料，本文根据参数等效原则，在保证筏体的质量、质心以及外形尺寸一致的前提下，将筏体简化为均质的各向同性弹性体，用 8 结点的六面体单元对其筏体进行有限元网格划分，接着通过实验测试，根据试验结果对弹性体的弹性参数进行修改并最终确定用于计算分析的弹性参数。

由于 MSC. Patran2000 还不能直接施加加速度载荷，因此在进行瞬态响应分析时采用大质量法，其中大质量用接地的 0 维质量单元建模。

浮筏隔振系统的有限元网格模型如图 4 所示。

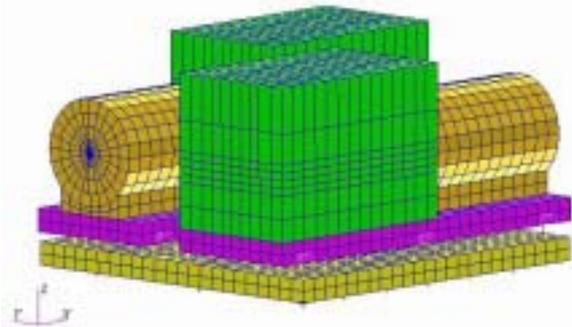


图 4 浮筏隔振系统有限元网格模型

## 2.3 理论模态分析与模态测试

由于在建立浮筏隔振系统的有限元模型时对柴油发电机组以及筏体进行了简化，因此对筏体以及浮筏隔振系统进行理论模态分析以及模态测试的目的在于确定简化后的柴油发电机组以及筏体的弹性参数。

应用 MSC. Nastran 对筏体进行自由支承条件下的模态分析，经过参数修正后，筏体的前 11 阶弹性模态，筏体的固有频率见表 1。筏体的前 2 阶弹性模态振型如图 5 所示。其中第 1

阶弹性模态为筏体的第 1 阶扭转振型，第 2 阶弹性模态为筏体的第 1 阶弯曲振型。

应用 MSC.Nastran 对该浮筏隔振抗冲系统进行模态分析，系统的前 10 阶固有频率的计算结果如表 2 所示。

在完成筏体的施工后，采用锤击法对筏体的模态振型和模态频率进行了测定<sup>[4]</sup>。为了模拟筏体的自由支承条件，采用 12 个软弹簧将筏体支承于地面上。测试结果显示，筏体的前 2 阶弹性模态振型与图 5 所示一致，筏体模态频率的测试结果见表 1。

表 1 筏体固有频率计算结果与试验结果

模态序	固有频率	
	测试结果	计算结果
1	62.26	62.51
2	94.96	90.76
3	107.32	109.27
4	152.74	155.79
5	264.21	261.99
6	293.51	283.69
7	314.39	308.11
8	338.58	342.28
9	501.36	501.2
10	547.25	547.5
11	576.43	580.43

表 2 浮筏隔振系统固有频率计算结果

模态序	固有频率
1	4.33
2	4.42
3	5.51
4	6.51
5	6.99
6	7.80
7	9.71
8	10.36
9	13.82
10	15.27

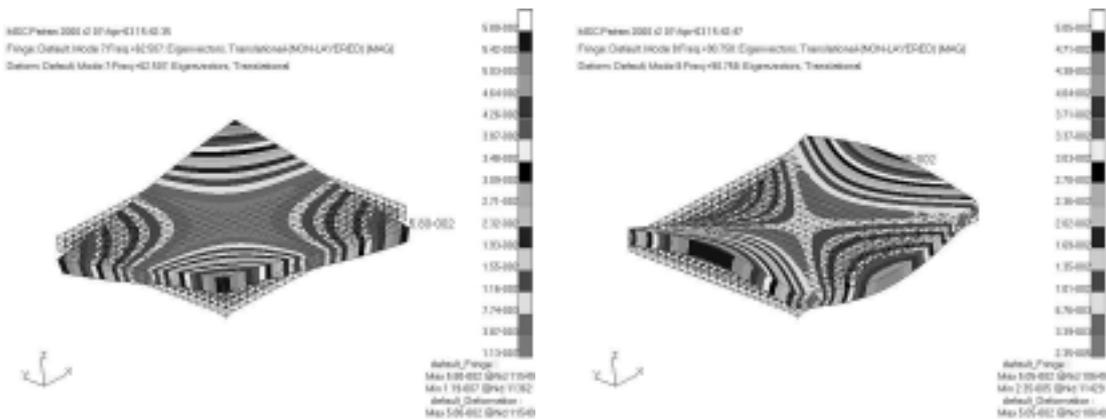


图 5 筏体的弹性模态振型

在对系统进行有限元建模时，对系统进行了适当的简化，因此可以通过测试结果（主要是筏体的材料参数和筏体的弹性模态参数）对模型进行修正，主要修正的参数是筏体的弹性参数。从表 1 可以看出，计算结果与测试结果吻合较好，说明经过参数修正后的有限元模型可以很好的描述实际的系统，因此可以利用该模型进行冲击响应分析。

## 2.4 冲击载荷

大多数情况下设备的冲击载荷以设计冲击谱的形式给出，典型的设计冲击谱曲线如图 6 所示。

根据船舶建造规范，设计冲击谱有如下的基本特征：

- 设计冲击谱分布的频率范围为 3 ~ 500Hz，阻尼为临界阻尼的 1%；当设备或系统的支承频率 3Hz 时，适当考虑长时效应，这种效应主要是由于气泡脉动引起的船体结构的低频振动而产生；
- 设计冲击谱通常由等位移、等速度和等加速度三段曲线组成，GJB1060.1 规定的设计冲击谱没有等位移段；
- 设计冲击谱的最大位移为  $d_0$ ，最大速度为  $v_0$ ，最大加速度为  $a_0$ ；
- 等速度谱分布的频率范围从频率  $f_1$  到  $f_2$ ，其中  $f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{v_0}{d_0}$ ， $f_2 = \frac{1}{2\pi} \frac{a_0}{v_0}$ 。

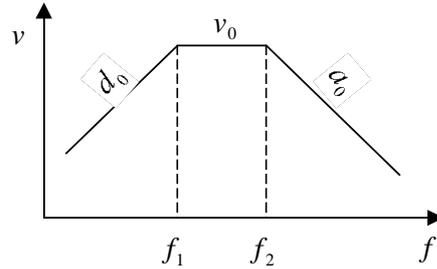


图 6 典型的设计冲击谱曲线

因此，本文进行时域分析时需要将设计冲击谱转换为等效的时域加速度历程曲线。根据船舶建造规范，设计冲击谱可以等效为双三角形或双半正弦时间历程曲线，如图 7 所示。时间历程曲线的参数与设计冲击谱之间的关系为：

(1) 双三角形时间历程曲线：

- 正三角形的加速度峰值为加速度谱的 0.6 倍；
- 两个三角形的面积相等，为速度谱的 0.75 倍；
- 加速度历程积分两次得到位移，该位移值为位移谱的 1.05 倍。

因此有：

$$a_2 = 0.6a_0, \quad t_3 = 2.5 \frac{v_0}{a_0}, \quad t_2 = \frac{v_0}{a_0}, \quad t_5 = \frac{6.3d_0 - 0.96a_0t_3^2}{0.96a_0t_3},$$

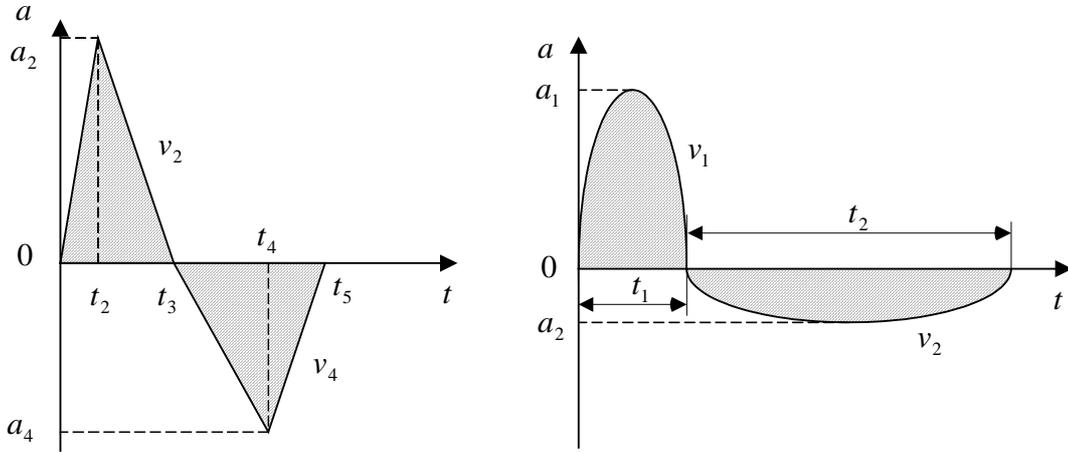
$$t_4 = t_3 + 0.6(t_5 - t_3), \quad a_4 = -\frac{1.5v_0}{t_5 - t_3}$$

(2) 双半正弦时间历程曲线：

- 正半正弦的加速度峰值为加速度谱的 0.5 倍；
- 两个三角形的面积相等，为速度谱的 2/3 倍；
- 加速度历程积分两次得到位移，该位移值与位移谱值相等。

因此有：

$$a_1 = 0.5a_0, t_1 = \frac{2\pi v_0}{3 a_0}, t_2 = \frac{2d_0}{v_1} - t_1, a_2 = \frac{\pi v_2}{2 t_2}$$



(a) 双三角形时间历程曲线

(b) 双半正弦时间历程曲线

图 7 加速激励时间历程曲线

本次分析中根据船舶建造规范，假定设计冲击谱为  $d_0 = 40mm$ ， $v_0 = 5m/s$ ， $a_0 = 2000m/s^2$ ，且假定该冲击谱为垂向设计冲击谱。本文的计算仅计算了垂向冲击作用时系统的冲击响应，而横向冲击和纵向冲击时系统冲击响应的计算与垂向冲击时的计算方法相同，不同的是冲击激励即设计冲击谱值不同。

## 2.5 冲击响应计算

对该浮筏隔振系统模型进行瞬态响应分析。采用直接法进行计算，计算中仅计算了垂向激励时的冲击响应，横向激励和纵向激励时的冲击响应计算方法与垂向激励时的计算方法一致。

分析中采用大质量法对模型施加载荷，对大质量所施加的激励力  $F$  由下式确定：

$$F = Ma$$

其中  $M$  为集中接地大质量，其取值为所分析系统结构质量的  $10^6$  倍<sup>[3]</sup>， $a$  为基础的加速度激励，为时间  $t$  的函数。

本文计算用的冲击载荷如前文所述，计算时分别应用双半正弦和双三角形加速度时间历程曲线对浮筏隔振装置的冲击响应特性进行计算。通过计算可以得到柴油发电机组和中间筏体的加速度响应以及位移响应，同时还可以求得系统在冲击作用下的应力分布。

图 8 所示为柴油发电机组的垂向加速度响应曲线，图 9 所示为柴油发电机组相对基础的垂向位移响应曲线，图 10 所示为中间筏体在冲击作用下的 von Mi ses 应力云纹图。

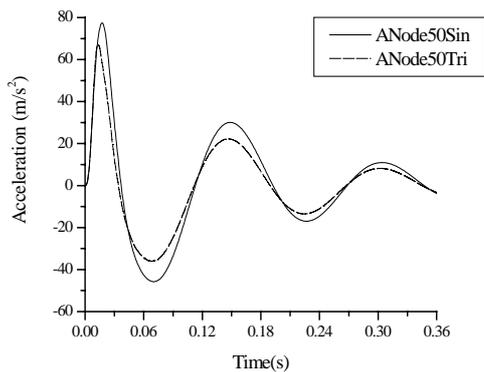


图 8 柴油发电机组的垂向加速度响应

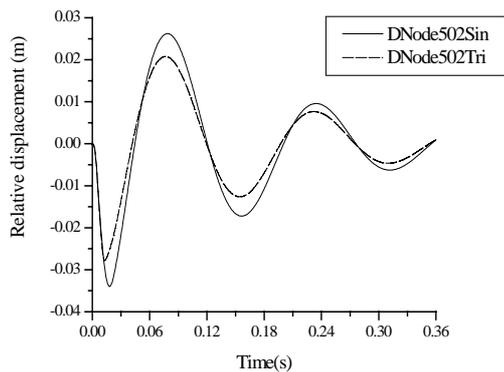
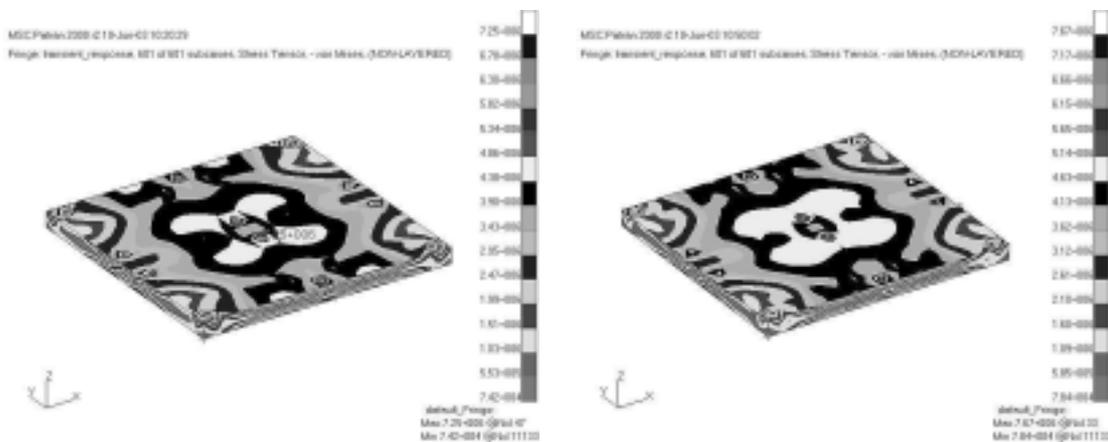


图 9 柴油发电机组相对基础的垂向位移响应



(a) 双半正弦加速度曲线激励时  
筏体的 von Mi ses 应力

(b) 双三角形加速度曲线激励时  
筏体的 von Mi ses 应力

图 10 筏体的应力分布

从加速度响应曲线图和相对位移响应曲线图可以看出双半正弦曲线加速度冲击时的响应比双三角形曲线加速度冲击时的响应稍大，但两种冲击作用下系统响应的变化趋势相同，说明系统的冲击响应时域曲线形状主要由系统的固有特性决定。

另外从图中还可以看出浮筏隔振系统对冲击加速度衰减较大，满足抗冲击的要求。

从筏体的应力分布图上可以看出，两种加速度激励时的筏体应力分布基本一致，中间筏体主体应力最大值为 6MPa 左右，局部最大应力为 7.5MPa 左右。环氧树脂的抗拉强度为 20MPa，抗压强度为 140MPa，抗弯强度为 30MPa，而环氧树脂混凝土的强度更高，因此中间筏体的应力满足冲击要求。

由于在建立有限元模型时，没有考虑隔振器的刚度非线性和阻尼非线性，因此为了获得更准确的有限元模型和得到更精确的计算结果，在计算隔振装置的抗冲击性能时，还应对隔振器的冲击刚度进行试验测试，用测试所得的冲击刚度数据进行冲击响应计算。由于测试所得的隔振器冲击刚度通常是非线性的，因此在计算中应采用本文工程实例计算所采用的直接法（时域计算方法）进行分析计算，即只能在时域进行分析计算。

### 3 结论

本文首先对 MSC.Nastran 大型有限元分析软件的瞬态响应分析功能进行了介绍,接着应用该软件的前后处理模块 MSC.Patran 对游船上浮筏隔振装置进行有限元建模,并对其进行理论模态分析和瞬态响应分析。从计算结果可以看出该浮筏隔振系统可以很好的满足隔振的要求,也满足船舶的冲击环境条件要求,因此浮筏隔振抗冲系统的设计是成功的。

在进行冲击响应计算时,采用直接法瞬态响应分析方法进行,该方法属于时域的计算方法,特别是在进行船舶浮筏隔振系统的冲击响应分析时通常应考虑隔振器的非线性冲击刚度和非线性阻尼,此时只能应用本文所介绍的时域分析方法进行。

在应用本文介绍的冲击响应计算分析方法进行船舶浮筏隔振系统的抗冲击性能分析时,若能够对隔振器的冲击刚度进行试验测试,用测试结果进行分析计算,计算结果将更准确。

### 4 参考文献

- [1] R. J. Scavuzzo and H. C. Pusey. Naval Shock Analysis and Design[M]. Falls Church: The Shock and Vibration Information Analysis Center, 2000.
- [2] 王远功. 冲击问题的动态分析方法[J]. 振动与冲击, 1994, (49): 41-45.
- [3] Gregory J. Moore. MSC.Nastran Basic Dynamic Analysis User's guide[M]. Los Angeles: The MacNeal-Schwendler Corporation, 1978.
- [4] 施引, 朱石坚, 吕志强, 何琳, 黄映云. 豪华游艇用双层减振(浮筏式)装置研究[J]. 海军工程学院学报, 1995, (71): 1-4.